

多端子 FeFET のリザーバーコンピューティングによる非線形時系列予測の性能評価

Evaluation of Nonlinear Time-series Prediction by Reservoir Computing Using Multi-terminal FeFET

東大院工, ^{○トプ}ラサートポン カデイト, 名幸 瑛心, 王 澤宇, 中根 了昌, 竹中 充, 高木 信一

Univ. Tokyo, ^{○Kasidit}Toprasertpong, Eishin Nako, Zeyu Wang, Ryosho Nakane, Mitsuru Takenaka, Shinichi Takagi

E-mail: toprasertpong@mosfet.t.u-tokyo.ac.jp

【背景】我々は、時系列データを効率的に学習・計算処理できるリザーバーコンピューティングを強誘電体ゲートトランジスタ (FeFET) により実装する事を提唱している^[1]。FeFET の短期記憶および非線形性をドレイン電流で読み出すことで、パリティチェックのような非線形タスクを計算できることを実証した^[2]。本研究では、4 端子素子である FeFET のドレイン電流、ソース電流および基板電流を読み出すことでリザーバーを高次元化することを報告する。このように工夫した FeFET リザーバーを用いて二次非線形時系列の予測タスクの性能も報告する。

【実験手法】二値入力 ± 0.5 の入力時系列 $u(n)$ を考える。Fig. 1 に示すように入力時系列を三角波の電圧波形に変換し、FeFET のゲート電圧として入力する。電圧波形の中心電圧を 0.5 V、振幅を 3 V ($u(n) = 0.5$ の場合は中心から +3 V の上三角波、 $u(n) = -0.5$ の場合は中心から -3 V の下三角波)、入力ステップの時間幅 T_{step} を 4 μs とした。FeFET のドレイン電流波形、ソース電流波形、および基板電流波形をそれぞれ、1 入力ステップあたりに 200 点サンプリングし、仮想ノード^[3]として用いた。合計 600 点の仮想ノードと重みとの積和をとることでシステム出力 $y(n)$ を得た。

訓練の段階において、リザーバーシステム出力 $y(n)$ が二次非線形時系列^[4] $d(n)$

$$d(n) = 0.4d(n-1) + 0.4d(n-1)d(n-2) + 0.6u^3(n) + 0.1 \quad (1)$$

に従うようにリッジ回帰で重みを決定した。学習したシステムの性能評価を行うために、未知

の入力時系列に対するリザーバーシステム出力 $y(n)$ を求め、(1)式の二次非線形時系列を正しく予測できるかの評価を行った。

【結果と考察】未知の入力時系列に対するリザーバーシステム出力 $y(n)$ と正解に相当するモデル出力 $d(n)$ を Fig. 2(a) に示した。FeFET のリザーバーシステムが、二次非線形時系列を予測できるように学習できたことが示唆される。Fig. 2(b) に示したように $d(n)$ と $y(n)$ の相関をプロットするとほぼ線形になり、 $y(n)$ が $d(n)$ を予測できている様子が確認できた。正規化平均二乗誤差 (NMSE) はドレイン電流のみ用いる際に 1.5×10^{-3} であるのに対し、ドレイン・ソース・基板電流を同時に用いると 8.3×10^{-4} と小さくなった。ドレイン電流のみ読み出す場合には閾値電圧以下での分極状態をうまく読み出せない動作条件があるが^[5]、ドレイン・ソース・基板電流を複合的に用いることで、FeFET のより多様な状態を読み出せるようになった。これはリザーバーノードの高次元化により、リザーバー性能を向上させたといえる。

【結論】4 端子素子である FeFET の複数の端子電流を積極的に活用することで FeFET リザーバーを高次元化し、二次非線形時系列の予測において、優れた性能が得られることを実証した。

【謝辞】本研究は、科学研究費(21H01359)と JST-CREST(JPMJCR20C3)の支援により実施した。

【参考文献】

- [1] トプ ラサートポン 他, 応物学会秋季講演会, 19p-F211-4 (2019).
- [2] E. Nako et al., *VLSI Tech.*, TN1.6 (2020).
- [3] L. Appeltant et al., *Nat. Commun.* **2**, 468 (2011).
- [4] A. Atiya et al., *IEEE Trans. Neural Netw.* **11**, 697 (2000).
- [5] Z. Wang et al., *SSDM*, B-3-04 (2021).

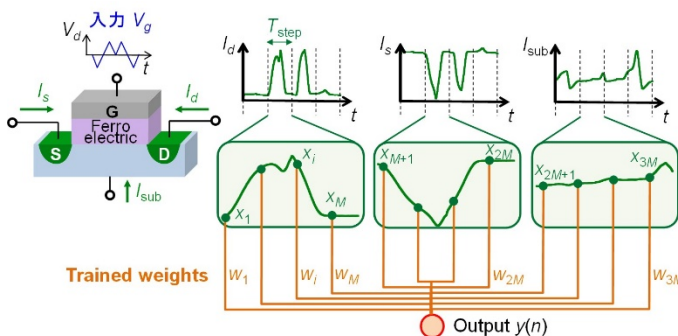


Fig. 1 Reservoir computing with a multi-terminal FeFET.

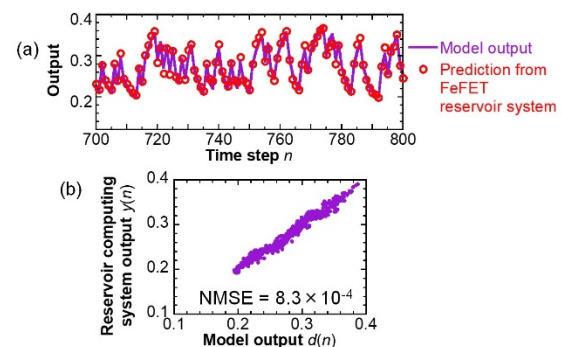


Fig. 2 Prediction results of FeFET reservoir system shown as a function of (a) time step n and (b) model output $d(n)$.